

УДК 621.9.01:519.6

Криворучко¹ Д.В. д.т.н., доц., Сторчак² М.Г. д.т.н., с.н.с.

1-Сумской государственный университет, г. Сумы, Украина; 2-Институт станков университета Штутгарта, г. Штутгарт, Германия

ТЕМПЕРАТУРА ВНЕШНЕЙ ПОВЕРХНОСТИ СТРУЖКИ

Kryvoruchko¹ D, Storchak² M.1-Sumy State University, Sumy, Ukraine(dmytro.kryvoruchko@gmail.com); 2- Institute for Machine Tool of University Stuttgart, Germany(michael.storchak@ifw.uni-stuttgart.de)

TEMPERATURE FIELD OF OUTER CHIP SURFACE

В последние годы численное моделирование процесса резания получило значительное развитие. Для обеспечения практического использования численных моделей необходима их углубленная экспериментальная проверка и «калибровка» по различным показателям. В статье выполнен анализ возможности «калибровки» модели по температуре наружной поверхности стружки. Путем сравнения экспериментальных данных о температуре наружной поверхности стружки с результатами расчетов по аналитической модели показано, что температурное поле наружной поверхности стружки формируется главным образом за счет теплоты, образующейся при пластическом деформировании в зонах первичных и вторичных деформаций. Экспериментальные исследования выполнены на специальном стенде для реализации ортогонального процесса резания. Измерения температуры внешней поверхности стружки выполнялись бесконтактным методом посредством быстродействующего пирометра, обеспечивающего измерение температуры стружки при установленных для обрабатываемого материала диапазона скоростей резания. Измерение температур и сил резания выполнялись с применением оборудования фирмы National Instruments и программных средств LabVIEW. Обработка и запись сигналов выполнялась посредством многофункциональной измерительной карты, встроенной в PC.

Ключевые слова: температура, теплота, стружка, модель, пирометр

Введение

За длительную историю развития теории резания основной оценкой термонапряженности при резании металлов является температура резания – максимальная температура на поверхности контакта инструмента с заготовкой и стружкой. Однако в современных условиях этой информации оказывается недостаточно. Развитие материаловедения, появление возможности создания градиентных материалов и наноструктур требует знания распределения температур в системе резания в реальных производственных условиях. Отдельные экспериментальные работы, посвященные этой проблеме, ограничиваются условиями больших толщин среза и малых скоростей резания [1]. Развитие измерительной техники дает новые возможности измерения температуры [2]. Применение высокоскоростных термокамер большого разрешения позволяет изучить изменение температурного поля на боковой поверхности лезвия при низких и средних скоростях резания. Такой подход хоть и дает представление о распределении температуры на передней поверхности, но несколько занижает получаемые значения температур из-за теплоотвода в окружающую среду. Применение пирометров, также как и искусственных термопар позволяет получить данные о температуре в заданной точке конечного диаметра. За счет размещения датчика вблизи контактной поверхности температура может быть измерена в непосредственной близости к ней, но все же на некотором расстоянии. Несмотря на большую точность этих

измерительных приборов, из-за наличия значительных градиентов температуры (рис.1) такой способ также дает заниженные значения температуры. Более того, сложность изготовления большого количества отверстий в режущей части технических ограничивает возможность получения распределения температур на поверхности контакта.

Таким образом, все еще не удается экспериментально получить распределение температур непосредственно на контактной поверхности. Это связано с малыми размерами контактной поверхности, ее недоступностью для прямого наблюдения, высокой скоростью резания и большим ($10^{\circ}\text{C}/\text{мкм}$ и более) градиентом температур.

Перспективным подходом к решению указанной проблемы является применение численных методов для расчета температурных полей в системе резания [3], выполнив «калибровку» получаемых

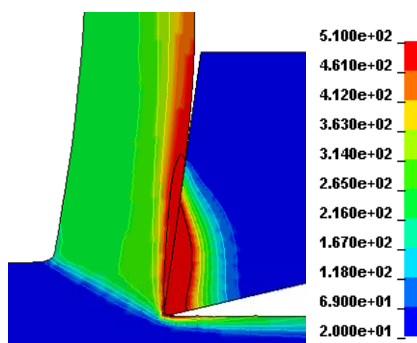


Рис. 1. Распределение температуры в главной секущей плоскости при резании стали 45: $V=200$ м/мин, $a=0.3$ мм

решений по температуре в нескольких характерных точках системы резания. Одной из таких легкодоступных точек является внешняя поверхность стружки. На этой поверхности, например, с помощью высокоскоростного пирометра, может быть измерена температура, которая характеризует тепловое состояние в системе резания и температурное поле, сформировавшееся в ней. Вместе с тем, непонятно, в какой степени температура на этой поверхности зависит от условий в зоне первичных деформаций и на контактной границе «стружка-лезвие». Поэтому **целью настоящей работы** является исследование чувствительности температуры внешней поверхности стружки к изменению условий в системе резания и оценки возможности «калибровки» модели процесса резания по этому показателю.

Теоретическая оценка температуры внешней поверхности стружки

В настоящее время считается общепринятым, что механическая работа, а значит и тепловыделение, происходит в зоне первичных деформаций, участках трения на передней и задней поверхностях лезвия [4].

Тогда на основании принципа суперпозиции повышение температуры $\Delta\Theta$ на внешней поверхности стружки вызывается действием этих трех источников теплоты может быть записано как:

$$\Delta\Theta = \Delta\Theta_1 + \Delta\Theta_2 + \Delta\Theta_3.$$

Вместе с тем только источник теплоты в зоне первичных деформаций выходит на внешнюю поверхность стружки. Теплоте от двух других источников необходимо время, чтобы достигнуть внешней поверхности. При резании абсолютно острым лезвием тепловыделение на задней поверхности весьма мало и в данном исследовании примем $\Delta\Theta_3 = 0$.

Для оценки повышения температуры $\Delta\Theta_1$ на внешней поверхности стружки предположим, что повышению температуры способствует только та теплота, которая образовалась в рассматриваемом объеме внешней поверхности, а стока теплоты через свободную поверхность не происходит. Это допущение справедливо при резании без охлаждения, когда критерий Пекле $Pe = \frac{V_c a}{\omega} \geq 10$ [5], где ω -

температуропроводность. Так, для случая резания стали 45 ($\omega = 10^{-5} \text{ м}^2/\text{с}$) при толщине среза $a = 0.1 \text{ мм}$ это условие удовлетворяется при скорости резания $V = 66 \text{ м/мин}$. Поэтому, при меньших скоростях следует ожидать уменьшения температуры $\Delta\Theta_1$, вследствие оттока теплоты в соседние зоны в процессе движения стружки.

Приращение температуры в плоскости сдвига и в объеме стружки, в непосредственной близости к передней поверхности, равно

$$\Delta\Theta_1 = \chi(1-\beta) \frac{\sigma_S \varepsilon}{C_m \rho}, \quad (1)$$

где C_m - массовая теплоемкость; ρ - плотность; σ_S - напряжения течения в плоскости сдвига; β - коэффициент ($0 < \beta \leq 1$), учитывающий, что не вся работа деформации преобразуется в тепло; χ - коэффициент ($0 < \chi \leq 1$), учитывающий, что не вся работа деформации осуществляется в условной плоскости сдвига. Для случая адиабатической деформации можно принять, что $\chi = 1$. Для условий, в которых проводились экспериментальные исследования $\beta \approx 0.15$ [6, 7].

Известно, что зона первичных деформаций при традиционных скоростях резания концентрируется в узкой области. Пусть толщина этой области, значительно меньшей ее длины, а форма этой области, близка к плоскости (рис. 2) [6]. В этом случае интенсивность пластических деформаций равна

$$\varepsilon_p = \frac{K_L^2 - 2K_L \sin \gamma + 1}{\sqrt{3} K_L \cos \gamma}, \quad (2)$$

Напряжение в условной плоскости среза подчиняются определяющему уравнению. По данным работы [7] для стали 45 (HB130) без учета температурно-скоростного эффекта определяющее уравнение может быть использовано в виде:

$$\sigma_S(\varepsilon_p) \approx (410 + 280 \cdot \varepsilon_p^{0.47}).$$

Из формулы (1) следует, что повышение температуры $\Delta\Theta_1$ напрямую не зависит от скорости резания. Влияние скорости возможно только через усадку стружки. При достаточно малых размерах зоны наблюдения $\Delta\Theta_1$ будет практически постоянной во всех точках этой зоны.

Для оценки $\Delta\Theta_2$ рассмотрим скольжение стружки по

передней поверхности. В первом приближении допустим, что распределение касательных контактных напряжений на поверхности контакта равномерно. Свяжем систему координат с режущей кромкой лезвия.

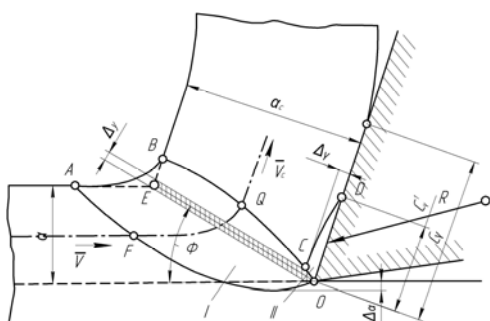


Рис. 2. Модель зоны стружкообразования [8]

Выделим на поверхности контакта площадку длиной dx с координатой x . Тогда, в результате скольжения возникающие силы сопротивления приведут к выделению на этом участке удельной теплоты:

$$dQ = qd\tau,$$

где $q = \frac{F_\tau V_c}{b} = \frac{\tau_n C_\gamma b V_c}{b} = \tau_n C_\gamma V_c$ - удельная мощность теплового потока на контактной границе, Вт/м, $V_c = V/K$ - скорость стружки, V - скорость резания, K - усадка стружки, τ_n - средние контактные касательные напряжения, b - ширина стружки, C_γ - длина контакта на передней поверхности.

Для одномерного, движущегося вдоль оси X , источника температурное поле в точке пространства $(X = V_c \tau, Y = y)$ через время τ прохождения над ней источника задается соотношением [5]

$$\Theta^*(y, \tau) = \frac{q_1}{4\pi\lambda} \int_0^\tau \frac{dt}{\tau-t} e^{-\frac{(V_c t)^2 + y^2}{4\omega(\tau-t)}},$$

где λ - коэффициент теплопроводности, q_1 - удельная мощность одномерного источника.

Рассматривая тепловой источник на передней поверхности как совокупность бесконечно большого количества одномерных источников $q_1 = dq = \tau_n V_c dx$, повышающих температуру в точке наблюдения на величину $d\Theta_2 = \Theta^*$, можем описать температурное поле в стружке от полосового источника на передней поверхности уравнением:

$$\Theta_2(x, y) = 2 \frac{L+1}{L} \int_0^{C_\gamma} \Theta^*\left(y, x - \frac{x_\gamma}{V_c}\right) dx_\gamma. \quad (3)$$

В нем предполагается, что система координат связана с режущей кромкой, ось x направлена вдоль передней поверхности, ось y - в направлении стружки. Коэффициент $2 \frac{L+1}{L}$, полученный на основании принципа отражения источников, ограничивает формулу (3) лентой стружки толщиной $\Delta = a_c$,

$$L = 2 \left(1 + 2 \sum_{n=-\infty}^{+\infty} e^{-\frac{n^2}{u}} \right), \quad u = \frac{\omega \tau}{\Delta^2}.$$

Среднюю температуру на внешней поверхности стружки тогда можно вычислить по формуле:

$$\Delta \Theta_{2cp} = \frac{\int_0^d \Theta_2(x, a_c) dx}{d}, \quad (4)$$

где d - диаметр зоны наблюдения.

Методика экспериментальных исследований

Экспериментальные исследования процесса ортогонального резания выполнялись на специальном стенде [9], трёхмерная модель и общий вид которого представлен на рис. 3. Массивная станина стенда длиной 2 метра выполнена из полимербетона. Арматурой служит сварная стальная конструкция. На станине расположены направляющие качения, по которым перемещается стол с расположенным на нём трёхкомпонентным динамометром 9062 фирмы Kistler для измерения сил резания. На динамометре закреплена обрабатываемая заготовка в виде параллелепипеда размерами 170x60x3 мм. Стол с заготовкой приводится в движение линейным двигателем, управление которого осуществляется системой SIEMENS SIMOCom с сервоконтроллером, включающим электронику для управления силовыми приводами и ЭВМ в качестве управляющего контроллера. Изменение скорости перемещения стола с заготовкой обеспечивается бесступенчато в диапазоне от 0 до 200 м/мин, что соответствует принятому в промышленности для обработки резанием. Неподвижный инструмент с резцедержателем, закреплён на портале, соединённым со станиной четырьмя стержнями. Жесткость их соединения станиной регулируется путем изменения предварительного натяга стержней. Глубина резания устанавливается путем вертикального перемещения резцедержателя с инструментом с точностью 0,01 мм. Отличительной особенностью стенда является его существенная жесткость, которая регулируется путем введения элементов с детерминированной жесткостью.

Инструментом служил резец с передним $\gamma = 0^\circ$ и задним углом $\alpha = 8^\circ$, инструментальный материал - твердосплавные пластины Fa. Sandvik Coromant SNMA 15 06 12-KR. В качестве обрабатываемого материала использовалась сталь 45 (HB 165-174). Ширина заготовки составляла 3 мм.

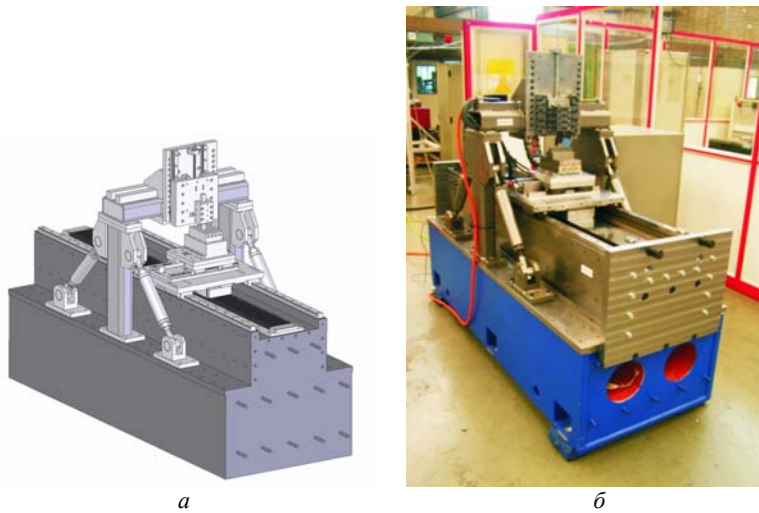


Рис. 3. Трёхмерная модель и общий вид стенда для экспериментальных исследований

При проведении экспериментальных исследований с помощью 3-х компонентного измерялись главная P_z и радиальная P_y проекции силы резания. Пиктограмма схемы измерения сил резания представлена на рис. 4.

Измерение температуры внешней поверхности стружки выполнялось бесконтактным методом посредством высокоскоростного пирометра модели IGA 740-LO с измерительной головкой LVA 25. Время между последовательными измерениями (время реакции) составляло 6 микросекунд, диаметр измерительного поля находился в пределах от 0,8 до 1 мм. Пиктограмма схемы измерения

температуры внешней поверхности стружки представлена на рис. 5, общий вид установки для измерения температуры – на рис. 6, а развертка характерного сигнала представлена на рис. 7. Для измерения сил и температур при резании использовался комплекс программ, разработанных в среде LabVIEW [10].



Рис. 4. Пиктограмма измерительной схемы силы резания

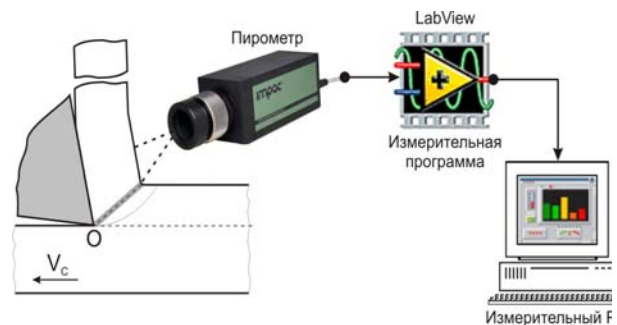


Рис. 5. Пиктограмма измерительной схемы температуры стружки при резании

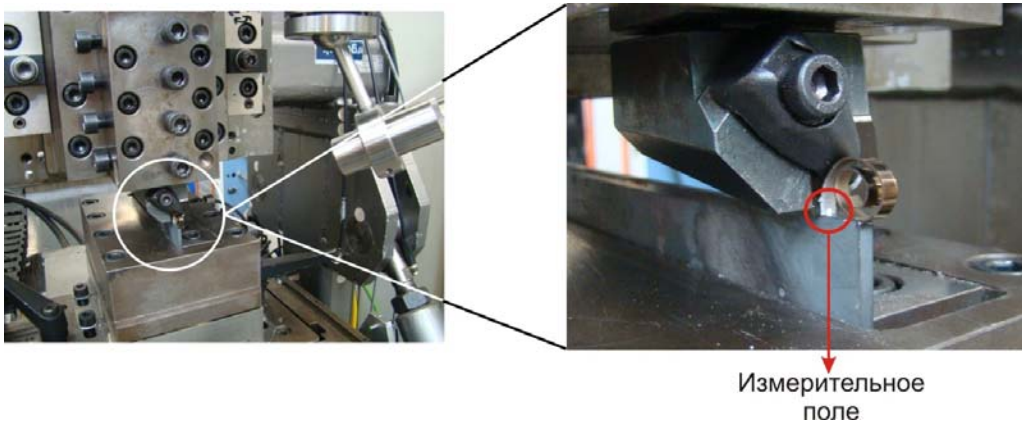


Рис. 6. Общий вид установки для измерения температуры

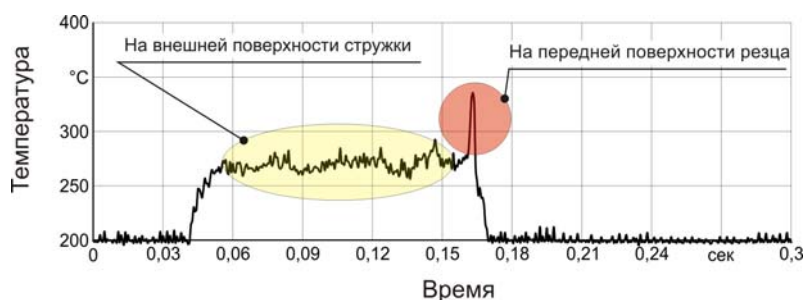


Рис. 7. Развертка характерного сигнала внешней температуры стружки при резании

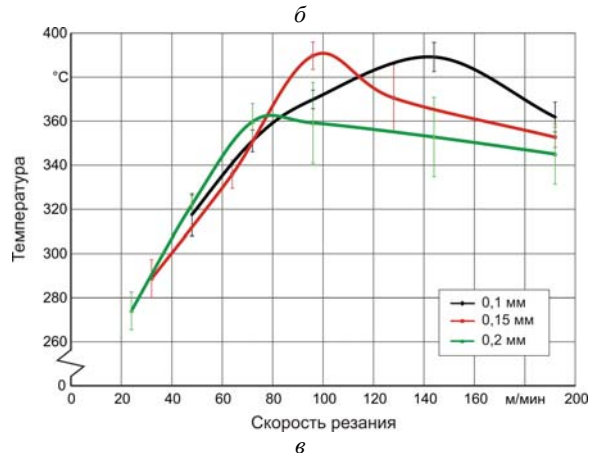
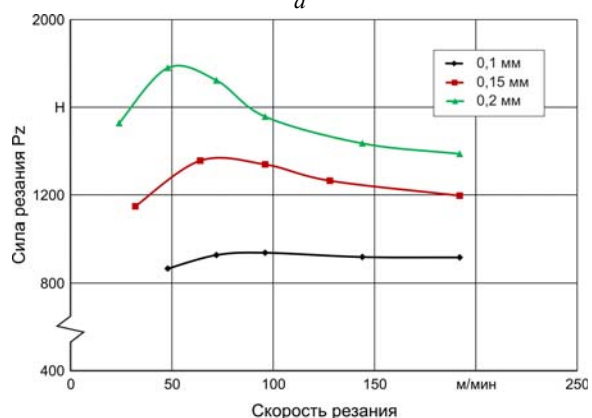
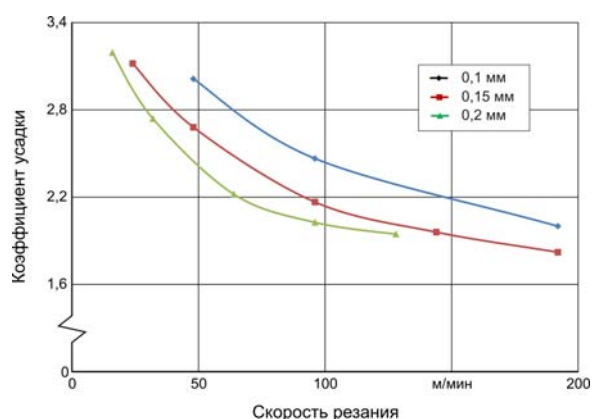


Рис. 8. Влияние скорости резания на усадку стружки (а), силу резания (б) и температуру внешней поверхности стружки (в)

При исследованиях изменялись глубина и скорость резания для условий постоянного числа Пекле равному 10, 15, 20, 30, 40, 60 и 80. При этом количество отдельных опытов в каждой точке измерений определялось величиной погрешности и лежало в пределах от 3 до 15. Статистическая обработка и визуализация полученных сигналов выполнялась посредством специальной программы [10].

В экспериментальных исследованиях скорость резания варьировалась в диапазоне от 10 до 200 м/мин, толщина среза от 0,1 до 0,3 мм.

Результаты и их обсуждение

В выполненных исследованиях усадка стружки монотонно уменьшалась с 3,2 до 1,9 с увеличением скорости резания от 10 до 200 м/мин (рис. 8, а). При этом сила резания проявляла экстремальный характер с максимумом в области 60 м/мин (рис. 8, б), что свидетельствует об активном наростообразовании в этом диапазоне скоростей [4].

Температура внешней поверхности стружки интенсивно возрастала в диапазоне от 20 до 80 м/мин для всех толщин среза, а затем, достигнув максимума, уменьшалась, стремясь в пределе к значению в диапазоне 340-350°C. Примечательно, что максимум температуры на внешней стороне стружки наблюдается при скоростях 70-140 м/мин, т.е. больших, чем диапазон скоростей наростообразования. Следовательно, эта экстремальная зависимость не связана с наростообразованием.

С увеличением толщины среза температура внешней поверхности стружки уменьшается, причем особенно быстро при толщине среза близкой к 0,2 мм. Объяснением такого характера зависимости может являться влияние двух источников теплоты: источника в зоне первичных деформаций и источника в зоне вторичных деформаций и трения. Внешняя поверхность стружки непосредственно контактирует с источником теплоты в зоне первичных деформаций. Поэтому температура на внешней поверхности стружки полностью определяется этой теплотой.

С другой стороны, на внешнюю поверхность стружки поступает теплота со стороны передней поверхности – зоны вторичных деформаций и поверхности контакта. Для того, чтобы это тепло, определяемое мощностью источника, достигло внешней поверхности необходимо время, определяемое толщиной среза: оно тем меньше, чем меньше толщина среза.

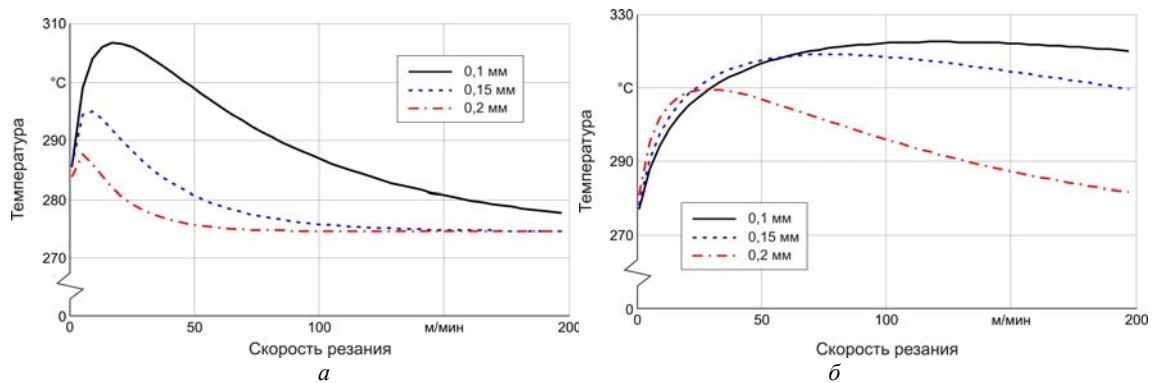


Рис. 9. Прогноз влияния скорости резания на температуру внешней поверхности стружки без учета (а) и с учетом (б) толщины зоны вторичных деформаций

Однако, стружка перемещается по передней поверхности с достаточно большой скоростью. Поэтому время на «прогрев» стружки ограничено – оно тем меньше, чем больше скорость резания. В результате такой конкуренции и наблюдается указанная зависимость температуры внешней поверхности стружки.

Выполненные аналитические расчеты по модели, описанной ранее в этой статье, подтверждают сделанные выводы (рис. 9). Действительно, с увеличением скорости резания температура внешней поверхности стружки возрастает, а затем уменьшается, в пределе стремясь к температуре зоны первичных деформаций. Вместе с тем, в расчете, предполагающем источник теплоты не только на границе контакта «инструмент-стружка», положение экстремума температуры сильно смещено в область низких скоростей резания (рис. 9, а). Это указывает на то, что теплота трения не успевает распространяться через стружку. Если же источник теплоты трения рассматривать объемным, существующим во всей области вторичных деформаций, то расчетные экстремумы температуры совпадают с экспериментальными (рис. 9, б). Действительно, с уменьшением толщины среза объем зоны вторичных деформаций увеличивается и при малых толщинах среза может достигать 90% [4].

Расчетные значения температуры внешней поверхности стружки занижены по сравнению с экспериментальными данными. Это объясняется заниженной мощностью тепловых источников возникающих из-за пренебрежения их размерами (особенно источника в зоне вторичных деформаций). В этой связи применение численных методов для расчета температурного поля в объеме стружки видится более рациональным, позволяющим получить более точные данные.

Выводы. 1. В результате проведенного исследования установлено, что температура на внешней поверхности стружки определяется теплотой, выделившейся в результате пластической деформации в зоне первичной и вторичной деформаций. Из-за высокой скорости скольжения и значительного расстояния источника трения на передней поверхности от внешней поверхности стружки теплота, образованная в результате трения, практически не влияет на температуру внешней поверхности стружки.

2. Конкуренция мощности источника и времени его пребывания в области наблюдения температуры определяет экстремальный характер влияния на температуру внешней поверхности стружки источника теплоты в зоне вторичных деформаций. Наибольшее влияние для условий резания стали 45 этот источник оказывает в диапазоне скоростей 80-160 м/мин.

3. Температура внешней поверхности стружки с увеличением скорости резания в пределе стремится к температуре в зоне первичных деформаций.

4. «Калибровка» модели процесса резания по температуре внешней поверхности стружки возможна, однако достоверная оценка по этому параметру может быть сделана только алгоритмов, ответственных за теплообразование в зонах первичных и вторичных деформаций, которые возможно выделить при моделировании процесса резания методом конечных элементов. Для оценки достоверности температурного поля в области передней поверхности должны быть разработаны другие методы.

Анотація. В останні роки числове моделювання процесу різання набуло значного розвитку. Для забезпечення практичного використання числових моделей необхідна їх поглиблена експериментальна перевірка та «калібрування» за різними показниками. В статті виконано аналіз можливості «калібрування» моделі за температурою зовнішньої поверхні стружки. Шляхом порівняння експериментальних даних про температуру зовнішньої поверхні стружки, отриманих швидкодійним пірометром, з результатами розрахунків за аналітичною моделлю показано, що температурне поле зовнішньої поверхні стружки формується головним чином за рахунок теплоти, що утворюється при пластичному деформуванні у зонах первинних та вторинних деформацій.

Ключові слова: температура, теплота, стружка, модель, пірометр.

Abstract. In recent years, machining simulation techniques have received considerable development. To ensure the practical use of the numerical models, they have to be experimentally approved and "calibrated" on the various indicators. The article analyzed the possibility of a "calibration" on the temperature of a chip outer surface. By comparing the experimental data on the temperature of the chip outer surface with the results of analytical modeling it was shown that the temperature field of the chip outer surface formed mainly by the heat generated during plastic deformation in the zones of primary and secondary deformation. Experimental investigations carry out at the special test bed for the orthogonal cutting. The stand of the test bed is made from massive polymer concrete slabs and carries the tool holder, which is mounted in gantry design. The measuring of the chip outer surface temperature is obtained with a high-speed pyrometer. This pyrometer ensures the measurement of chip outer surface temperature by for this material determinate cutting speed range. The measurement of cutting forces and cutting temperature realize with the hardware of National Instruments company and software of LABVIEW. The recording and processing of the signals with hardware is based on a multi-functional measuring board, which is integrated in the measuring computer.

Keywords: temperature, heat, chips, model, pyrometer

1. Резников А. Н., Резников Л. А. Тепловые процессы в технологических системах. -М.: Машиностроение, 1990, 288 с.
2. Sutter G., Faure L., Molinari A. и др. An experimental technique for the measurement of temperature fields for the orthogonal cutting in high speed machining//Int. J. of Machine tools & Manufacture. -2003. Vol. 43, с. 671 - 678.
3. Криворучко Д. В., Залогов В. А., Мазур Н. П. Анализ современных методов численного моделирования тепловых явлений при резании материалов//Сучасні технології у машинобудуванні: збірник наукових праць. -Х.: НТУ «ХПІ», 2007, Т. 3, с. 158 - 167.
4. Основи теорії різання матеріалів: підручник/Н. П. Мазур і др. -Львів: Новий світ, 2010, 422 с.
5. Резников А. Н. Теплофизика процессов механической обработки. -М.: Машиностроение, 1981, 279 с.
6. Oxley P. L. Mechanics of machining: An analytical approach to assessing machinability. -: Ellis Harwood Limited, 1989, 242 с.
7. Криворучко Д. В. Наукові основи моделювання процесів різання з використанням числових методів: Автореф. дисс. докт. техн. наук: 05.03.01/СумГУ. -Харків, 2010, 40 с.
8. Бобров Б. Ф. Основы теории резания металлов. -М.: Машиностроение, 1975, 344 с.
9. Heisel U., Storchak M. Simulation Tool for Modeling of Interaction Process by Orthogonal Cutting//Резание и инструмент, 2007, Т. 43, с. 335 - 341.
10. Сторчак М. Г. Комплекс программ для экспериментальных исследований процессов обработки/Сучасні процеси механічної обробки інструментами з НТМ та якість поверхні деталей машин. -К.: ІНМ ім. В. М. Бакуля НАН України, 2006, с. 225 - 231.

REFERENCES

1. Reznikov A. N., Reznikov L. A. Teplovye processy v tehnologicheskikh sistemah. Moscow.: Mashinostroenie, 1990, 288 p.
2. Sutter G., Faure L., Molinari A. и др. An experimental technique for the measurement of temperature fields for the orthogonal cutting in high speed machining. Int. J. of Machine tools Manufacture. 2003. Vol. 43, p. 671 – 678
3. Krivoruchko D. V., Zaloga V. A., Mazur N. P. Analiz sovremennyh metodov chislennogo modelirovaniya teplovyh yavleniy pri rezanii materialov//Suchasni tehnologii u mashinobuduvanni: zbirnik naukovih prac. H.: NTU «HPI», 2007, T.3, p.158 – 167
4. Osnovi teorii rizzannja materialiv: pidruchnik, N.P. Mazur i dr. Lviv: Novij svit, 2010, 422 p.
5. Reznikov A. N. Teplofizika processov mehanicheskoy obrabotki, Moscow: Mashinostroenie, 1981, 279p.
6. Oxley P. L. Mechanics of machining: An analytical approach to assessing machinability.: Ellis Harwood Limited, 1989, 242 p.
7. Krivoruchko D. V. Naukovi osnovi modeljuvannja procesiv rizzannja z vikoristannjam chislovihi metodiv: Avtoref. diss. dokt. tehn. nauk: 05.03.01/SumGU. Harkiv, 2010, 40 p.
8. Bobrov B. F. Osnovy teorii rezanija metallov. Moscow: Mashinostroenie, 1975, 344 p.
9. Heisel U., Storchak M. Simulation Tool for Modeling of Interaction Process by Orthogonal Cutting. Резание и инструмент, 2007, Т. 43, p. 335 – 341.
10. Storchak M. G. Kompleks programm dlja jeksperimental'nyh issledovanij processov obrabotki. Suchasni procesi mehanichnoї obrobki instrumentami z NTM ta jakist poverhni detalej mashin. Kyiv: INM im. V. M. Bakulja NAN Ukraini, 2006, p. 225 - 231.